

被覆ブロック形式床止め工の変状水理実験から 整理された研究課題

RESEARCH GAPS SUGGESTED BY HYDRAULIC EXPERIMENT OF THE DEFORMATION OF BLOCK COVERED GROUNDSILL

山本 陽子¹・中村 良二²・諏訪 義雄¹
Yoko YAMAMOTO, Ryoji NAKAMURA and Yoshio SUWA

¹正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²非会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室

In this report, a movable bed hydraulic model experiment was carried out for a block type groundsill with a flexible structure assuming a state under river bed degradation. If the flow volume increases and the downstream water level drops beyond a certain limit, the mattresses will flow away and the groundsill itself will lead to catastrophic damage. We introduce the deformations and failures observed, and also organize necessary research themes in the future. In conclusion, it is necessary to develop a hydrological calculation method combined with the local adaptive flow field with streams mixed with subcritical flows and supercritical flows on the bed variation considering the non-hydrostatic pressure distribution.

Key Words : *Groundsill, flowing of the bed protection mattress, failure hydraulic experiment, shooting flow, non-hydrostatic pressure distribution, mechanism of sand suction*

1. 背景

床止め工は、河床高に落差が生じる場所に設けて縦断的に河道変化を抑制する構造物である。下流河道との粗度のすりつけ等のため、異形ブロック等屈とう性を有する護床工を下流側に置いている。「床止めの構造設計手引き」¹⁾における設計の考え方は、落差によって生じる射流の高速流を、護床工を含めた床止め工区間で跳水により減勢させて、常流の円滑な流れとして下流側河道に引き継ぐこととしている。

一方、上流からの供給土砂量の減少、二極化の進行による滞筋の河床低下等により、設計で想定している以上の河床低下が床止め工の下流側で生じる可能性がある。その際、床止め下流側の水位も低下するため、跳水が発生しなくなる、あるいは跳水が下流側に移動する等して、護床工を含む床止め工上で減勢を完了させることができなくなる。その結果、床止め下流の河床に射流の高流速が作用し、洗掘孔が拡大あるいは河床が低下し、床止め工は設計で意図していない状態に置かれることになる。護床工は、予測以上の河床の低下への対応も期待しているものの、設計で想定していない状態における床止め工

の破壊限界外力を把握することは、床止め工の補強・更新の判断や、出水時の重点的監視等、河道管理上重要である。

本報告は、下流河床が低下しつつある状態を想定した屈とう性構造の被覆ブロック形式床止め工を対象に、移動床水理模型実験を実施し、そこで観察された変状や破壊を紹介するとともに、今後必要と考えられる研究課題を整理するものである。

2. 実験条件

屈とう性構造の被覆ブロック形式床止め工を対象に破壊実験を実施した。実験は、図-1に示す長さ31.5m、幅1m、深さ1.5mの水路を用いた縦断面2次元移動床実験である。幅1mとした水路の上流端から17mの地点に、図-2のような落差28cm、長さ4mの床止め模型を設置し、その上流2.5m(平坦河床)、下流約7m(河床勾配約1/89)に、粒径 $d_m=0.33\text{mm}$ の移動床区間を設けた。床止め工は上流端0.3mを水平の固定床盤とし、その下流の屈とう性構造部の縦断形は勾配1/10区間0.8m、水平部0.66m、勾配1/13区間2.6mとなっている。被覆ブロックは異形ブロッ

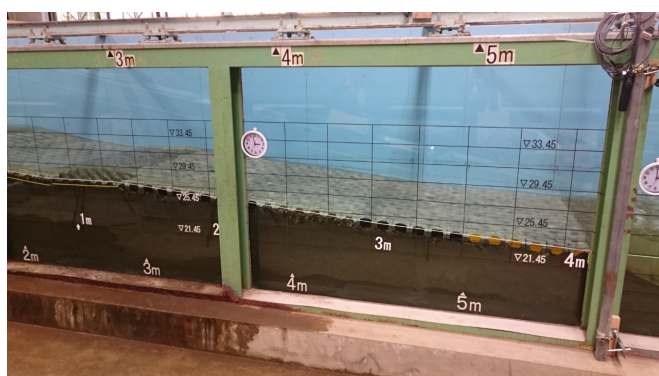
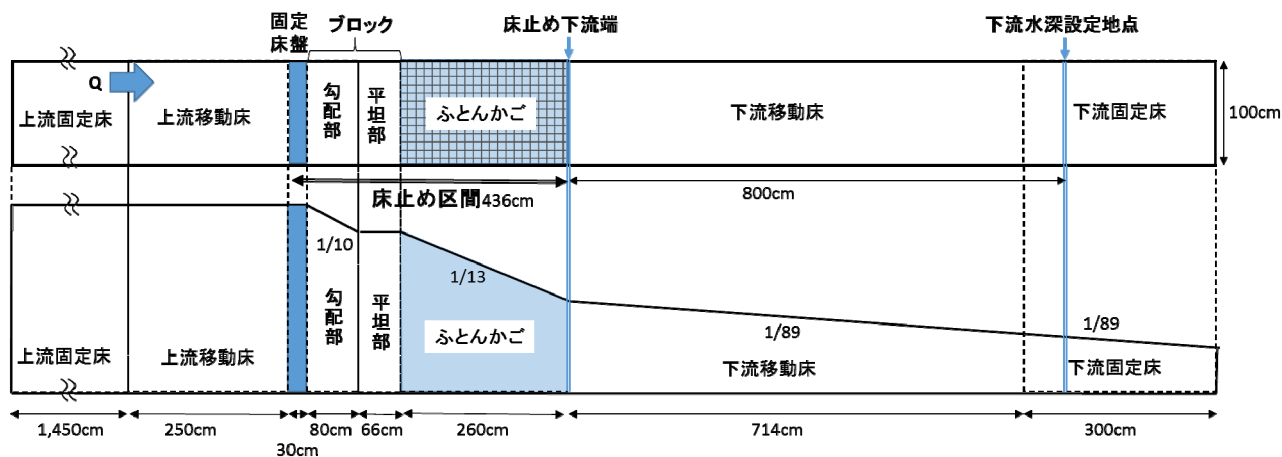


図-2 床止めの設置状況

表-1 単位幅流量及び下流水位条件

流量		下流水位	
模型 cm ³ /s/cm	(現地換算) (m ³ /s/m)	模型 cm	(現地換算) (m)
280	(2.5)	~10.0	(~2.0)
560	(5.0)	~17.5	(~3.5)
1,130	(10.1)	~25.0	(~5.0)
1,750	(15.7)	~30.0	(~6.0)

ク区間とふとんかご区間の2種類に分かれており、上流側1.46m（勾配1/10と水平部）は10.0cm×10.0cm×5.3cm、及び8.4cm×8.4cm×7.3cmの比重2.3のモルタル製異形ブロック、下流側2.6m（勾配1/13）は中詰め材粒径10mmのふとんかごで、かごの大きさは10cm×10cm×2.5cmと20cm×20cm×2.5cmの2種類を組み合わせで敷並べている。なお、予備実験において小流量でもふとんかごの下の河床材料が容易に移動して沈下・変形するので、ふとんかごの下には厚さ約30mm、粒径約10mmの砂利層を設けることとした。

現地との関係をイメージしやすくするため、縮尺1/20としてフルードの相似則で現地換算すれば、床止め工の落差は5.6m、河床材料は粒径 $d_{90}=6.6\text{mm}$ の中礫、異形ブロックは $2\text{m} \times 2\text{m} \times 1\text{m}$ 、ふとんかごは中詰め材粒径20cm、かごの大きさは $2\text{m} \times 2\text{m} \times 0.5\text{m}$ と $4\text{m} \times 4\text{m} \times 0.5\text{m}$ 、

かごの下には厚さ60cm, 粒径20cmの割栗石が設置されている想定となる。以降, 現地換算値を()内に併記する。

床止め工設置後に河床低下が進行していく状況を想定し、床止め工が変状・破壊する水理条件（単位幅流量と下流端水位）を整理し、変状・破壊のプロセスを整理し、メカニズムを推定した。プロセス・メカニズムの整理・推定にあたっては、水面形・流れ場との関係に着目した。

実験は、表-1の4ケース実施した。各ケースの単位幅流量は、 $280\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($2.5\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)、 $560\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($5.0\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)、 $1,130\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($10.1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)、 $1,750\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($15.7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)である。下流水位とは、床止め下流端より8m (160m)下流の固定床地点の水位である。水位は、床止め下流端の高さをゼロとしている。水位の調整は水路下流端にある転倒堰で行った。一定流量を通水し、下流水位を2.5cm (0.5m) ずつ段階的に下げていき、各水位における床止め工の変状や破壊を観察し、落ち着いたと判断されたところで次の段階の水位に下げていった。なお、給砂は行っていない。

3. 実験結果と考察

図-3に、床止め工の変状と破壊の発生・進行状況と水理条件の関係をマトリックスとして整理した。図は、縦軸に単位幅流量を下方向に大きくなるようとり、横軸に下流水位を右方向に小さくなるようとり、単位幅流量と下流水位の組み合わせにおける変状・破壊の状況を示している。大局を把握しやすくするため、変状・破壊の状況は、「変状なし」、「小さな変状はあるが進行しない」、「ふとんかごが流失せず破壊が進行しない」、「急激に破壊が進行」の4つに色分けして示した。このマトリックスが整理されれば、床止め工の変状発生や破壊が発生する水理条件がわかる。

次に、観察された変状や破壊の進行とその時の水面
形・流れ場（図-3、図-4～図-7）、破壊メカニズムを明

	下流水位 (cm)	30.0	27.5	25.0	22.5	20.0	17.5	15.0	12.5	10.0	7.5	5.0	2.5	0.0	-2.5	-5.0
	(現地換算) (m)	(6.0)	(5.5)	(5.0)	(4.5)	(4.0)	(3.5)	(3.0)	(2.5)	(2.0)	(1.5)	(1.0)	(0.5)	0	(-0.5)	(-1.0)
280cm ³ /s/cm (2.5m ³ /s/m)	跳水・上流端位置									床止め上	下流					
	洗掘孔と孔内の流れ									洗掘孔は拡大しない	洗掘孔の拡大 下流向き高速流			洗掘孔の拡大 下流向き高速流		
	ふとんかご												下流端1列移動	左岸側2列移動		
560cm ³ /s/cm (5.0m ³ /s/m)	跳水・上流端位置							床止め上	床止め下流端	下流						
	洗掘孔と孔内の流れ							洗掘孔は拡大しない	洗掘孔の拡大 流れは安定	下流向き高速流						
	ふとんかご										左岸2列移動	流失				
1,130cm ³ /s/cm (10.1m ³ /s/m)	跳水・上流端位置							床止め上	床止め下流端	下流						
	洗掘孔と孔内の流れ							洗掘孔は拡大しない	洗掘孔の拡大 流れは安定	下流向き高速流						
	ふとんかご									流失						
1,750cm ³ /s/cm (15.7m ³ /s/m)	跳水・上流端位置							床止め上	床止め下流端	下流						
	洗掘孔と孔内の流れ							洗掘孔は拡大しない	洗掘孔の拡大・流れは安定	下流向き高速流						
	ふとんかご									流失						

 : 変状なし
 : 小さな変状はあるが進行しない
 : ふとんかごが流失せず破壊が進行しない
 : 急激に破壊が進行

図-3 床止め工の変状と破壊の発生・進行状況

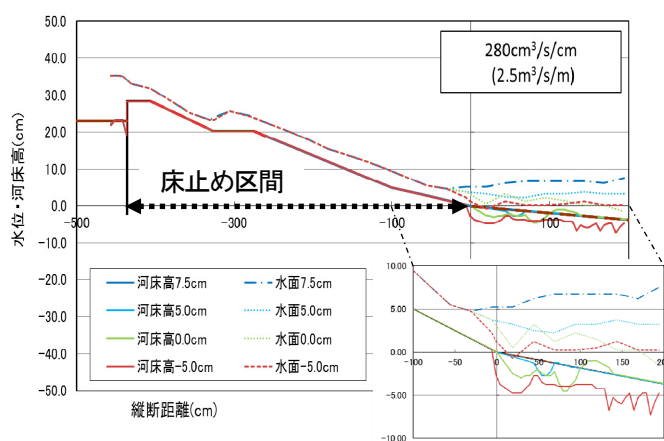


図-4 流量280cm³/s/cm (2.5m³/s/m)の水面形と河床形状

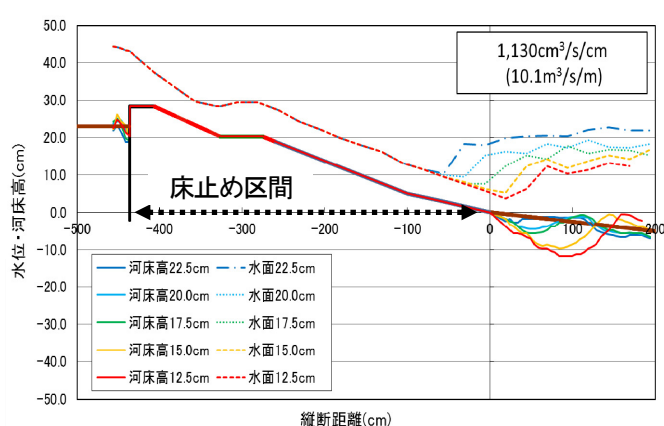


図-6 流量1,130cm³/s/cm (10.1m³/s/m)の水面形と河床形状

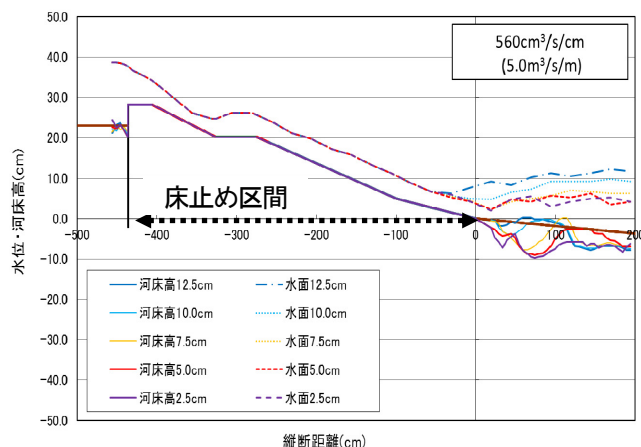


図-5 流量60cm³/s/cm (5.0m³/s/m)の水面形と河床形状

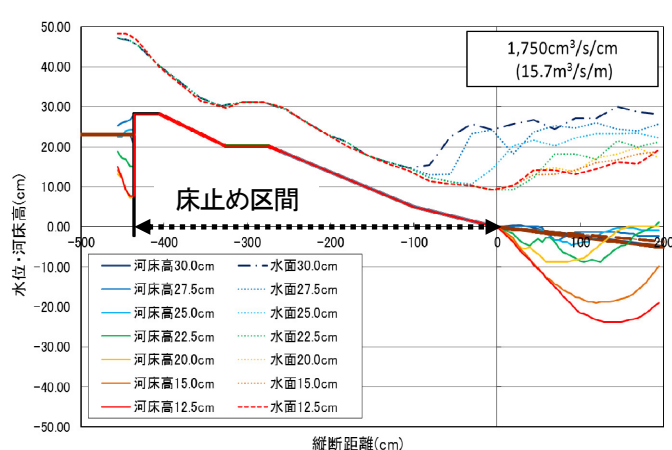


図-7 流量1,750cm³/s/cm (15.7m³/s/m)の水面形と河床形状

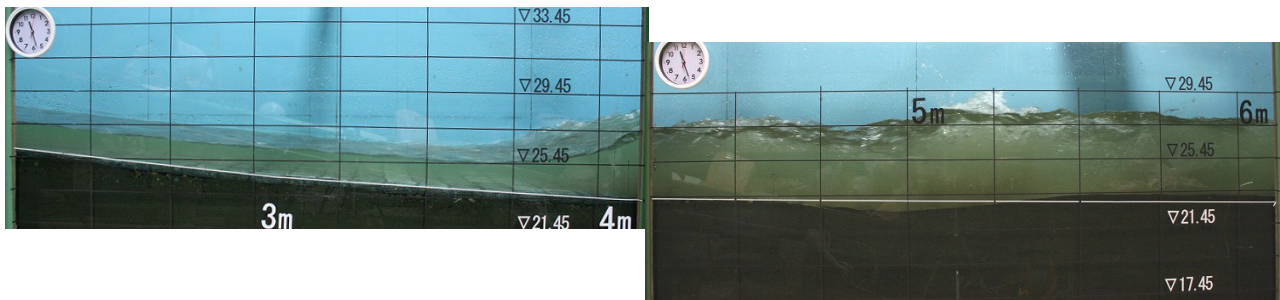


図-8 床止め下流端の跳水の状況（下流水位25.0cm）



図-9 床止め下流端の跳水の状況（下流水位17.5cm）

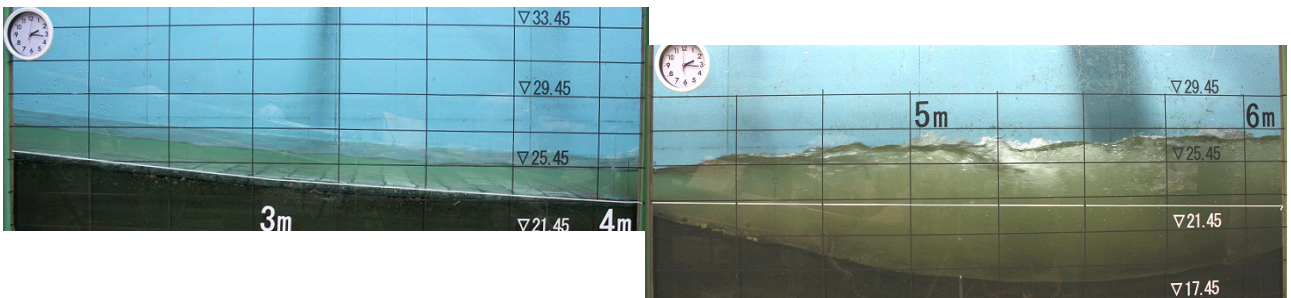


図-10 床止め下流端の跳水の状況（下流水位12.5cm）

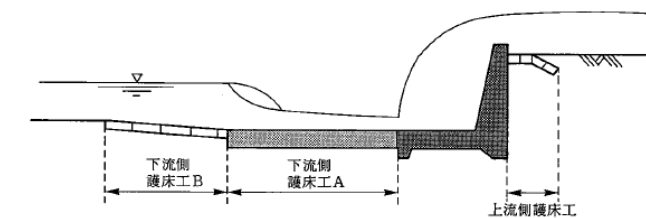


図-11 「床止めの構造設計手引き」の護床工の概念図¹⁾

らかにする上での研究課題について述べる。

単位幅流量 $1,750\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($15.7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)のケース（図-7）を例とすれば、下流水位が 25.0cm (5.0m)より大きければ、屈とう性構造部上で跳水が発生しており、射流による高流速は床止め上にしか作用しない。この状態では、床止め上の落差に伴う高流速が床止め工下流に流下する前に十分に減勢するので、床止め下流ではわずかな洗掘が発生するだけである。これは、「床止めの構造設計手引き」において、床止め工設計時に意図している水理状態である（図-8、図-11）。

下流水位が低下してくると、跳水発生位置が下流に移動する。単位幅流量 $1,750\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($15.7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)のケースの下流水位 22.5cm (4.5m)では跳水の上流端が床止め工下流端になり、射流による高流速の影響が床止め工下流の移動床河床に直接作用するようになる。このため、洗

掘孔が大きくなり、跳水発生位置が床止め下流端と洗掘孔上で安定する（図-9）。この時、内田ら（2003）²⁾が指摘する潜り噴流状態の流れ場が維持される流況となっている。この状態は、「床止めの構造設計手引き」で意図している護床工を含めた床止め工上で跳水を発生させ減勢させた上で下流に流下させる状況（図-11）を完全に満足させることはできていない。しかし、変状・破壊の進行は進まないで、この状態の安全が理論上も裏付けをもって確認できるのであれば、設計に取り入れることが可能となる。内田ら（2004）³⁾は、洗掘孔の防護を提案している。

さらに水位を下げると、洗掘孔上の安定した跳水を維持することができなくなり、跳水位置が下流に移動し、射流による高流速が洗掘孔河床面に直接作用するようになる（図-10）。その結果、洗掘孔の拡大・河床の低下が進行して流れ場が変化し、床止め下流端のふとんかごや洗掘孔に作用する流速が大きくなる。下流端ふとんかごの流失をきっかけに、上流側のふとんかごの流失が次々に伝播し（図-12）、固定してある固定床盤まで破壊が急激に進行する（図-13）。

流量が小さい単位幅流量 $280\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($2.5\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)のケースでは、下流端から1～2列のふとんかごが下流へ移動したが、それ以上の変状は見られなかった（図-3、図-4、図

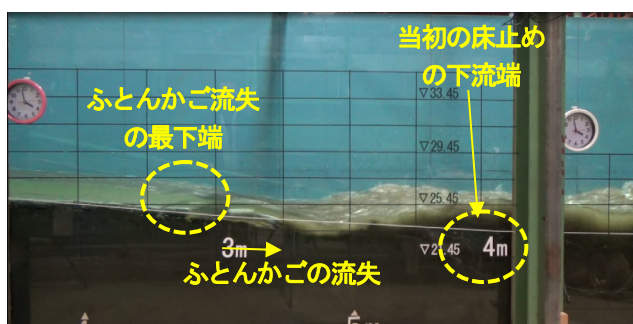


図-12 上流ふとんかごへの流失の伝播
($1,750\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($15.7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$))

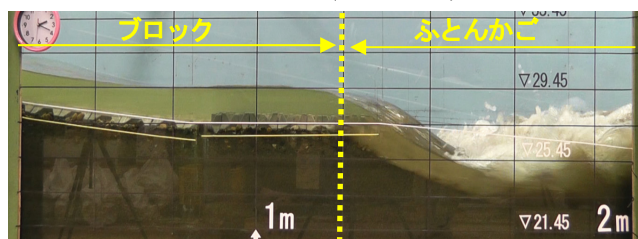


図-13 床止め上流側への破壊の進行
($1,750\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($15.7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$))



図-14 下流ふとんかごのみ移動するケース
($280\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($2.5\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$))

-14) . 洗掘孔内の流速がふとんかご単体を流失させるだけの大きさでなかったためと推察される。これは、常住 (2014) ⁴⁾ が指摘している、中小規模出水で見られる洗掘孔に流失したブロックが滞留することによりブロック流失が上流に伝播しない傾斜進行型にあたると思われる。

下流端ふとんかごの流失メカニズムはいくつかの可能性が考えられる。1つめは、下流端において粗度が粗から比較的滑なものに急変するため、水深が小さく・流速が大きくなることにより大きな流体力が作用して滑動するメカニズムである。これは、内田ら (2004) ⁵⁾ が指摘している。2つめは、端部の高流速が作用するため、ふとんかご下面の砂利層に作用する掃流力が移動限界掃流力を上回り、砂利が掃流されて抜ける (「吸い出し」メカニズムの1つと解釈できる) とともにふとんかご下面の滑動に対する摩擦抵抗が小さくなり滑動・流失するものである。中川ら (1987) ⁶⁾ が指摘している吸い出し現

象はこのメカニズムと思われる。3つめは、端部ふとんかご下流側の洗掘孔の発達あるいは河床低下と下流水位の低下により、ふとんかご下流端部で段落ち流れが発生し、上に凸の曲率を持つ流れが発生することにより圧力低下あるいは負圧が発生し、ふとんかご下の砂利や河床材料が抜け出していく (「吸い出し」メカニズムの1つと解釈できる) とともに、ふとんかごが流失するものである。2つめとの違いはふとんかご下の砂利や河床材料が「吸い出し」されるメカニズムであり、2つめが掃流力の増大によるのに対し、3つめは負圧発生による。2つめも3つめも1つめのメカニズムで指摘するふとんかごに作用する流体力の増大も影響していると考えられる。なお、川口ら (2004) ⁷⁾ は、段落ち流れ部の負圧発生による吸い出しのメカニズムを、パイピングによるものと推定している。3つめの流失メカニズムの変形版として、ふとんかごが流失する際に転動する場合もあるかもしれない。

いずれにしても、跳水による減勢が床止めの下流に移動して床止め区間の下流側河床で射流の高流速流れが発生している状態は、「床止めの構造設計手引き」で想定している状態とかけ離れている。これは、藤田ら

(2000) ⁸⁾ が整理している図で「構造物の安全度低下、劣化、機能低下」にあたり、設計時に想定した条件が失われている状態である。

4. 研究課題の整理

3. の実験結果から今後の研究課題を以下に4つ整理する。

(1) 急変流場内の水面形・流速・圧力分布の計算

内田ら (2004) ⁵⁾ が指摘しているように、護床工下流端部は粗度が急変する場である。また、護床工の急激な破壊が生じる際には、急変流場である跳水の発生位置が護床工より下流に移動する。その結果、河床に射流状態の高流速流れが作用し洗掘孔の拡大あるいは河床の低下が促進される。護床工下流端で落差が大きくなり段落ち流れが生じる場合もある。段落ち流れ場内の上に凸の流向変化が生じる場所では、局所的な圧力低下や負圧発生が生じる一方、高流速の水脈が洗掘穴の底や河床に衝突する場所では圧力上昇が起きる非静水圧分布の急変流場となる。このような常射流が混在する急変流場について、場所によって非静水圧分布となるという流れ場の本質を捉えることができる水理計算手法が重要である。

(2) 急変流場内の洗掘孔・河床変動の計算

(1) の急変流場の前提となる、河床低下、洗掘、段落ち等の河床形状を予測できる河床変動計算手法が重要である。(1) と連成させることにより、流れと河床の変化

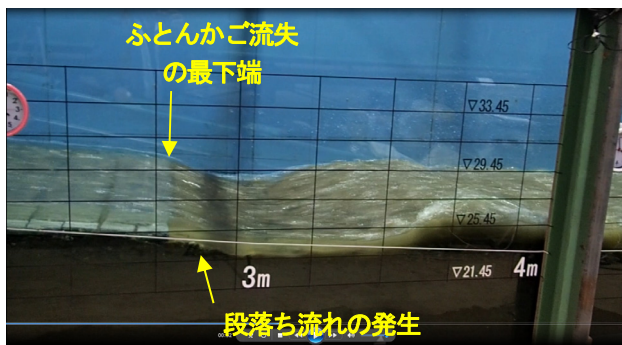


図-15 段落ち流れの発生 ($1,130\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ ($10.1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$))

を逐次予測できるようになる。

(3) 吸い出しのメカニズム解明と整理

護床工の下流側からの急激な流失が発生する際には、護床工の構成要素であるふとんかごや異形ブロックに作用する流体力に対し、重量が不足している場合が考えられる。3. の実験結果や川口ら (2002, 2004) ^{7),9)} の既往研究によれば、ふとんかごや異形ブロックの下の砂利・河床材料の吸い出しも起きている。このメカニズムが、砂利や河床材料に作用する掃流力が限界掃流力を上回った結果なのか、圧力低下・負圧による吸い出しなのか、ふとんかごやブロック下の砂利・河床材料にパイピングが発生したのかが明らかになると、破壊限界の評価や対策に科学的根拠に基づく理論上の裏付けを持たせることが可能になる。

(4) 急激な破壊の進行が評価できる動的計算

既往施設の破壊限界評価や補強・強化等の対策工を検討する際に、その都度、模型実験を行うことは時間と労力を要する。破壊の本質を捉えている計算であれば、破壊原因やメカニズムの特定が行える可能性もある。部分破壊した状態を評価するには、変状と破壊の進行を計算できる必要がある。また、補強対策の選択や更新時期の判断のために比較検討や感度分析等を行うには、模型実験よりも機動性に優れる数値計算の方が向いている。数値計算で補強対策の当たりづけをして、確認のために模型実験を行うという相互補完関係が望ましい。そのような役割を果たせる変状のきっかけから破壊の進行までを予測できる動的な計算手法が望まれる。

なお、本報告で対象とした床止め工の破壊機構は、下流河床の低下が進行し上下流水位差が大きくなる状況下で発生する護床工の下流側からの急激な流失の連鎖である。この機構を重視した理由は、著者のうちの1人が経験した床止め工破壊実験の中で最もカタストロフィックであり、洪水防御の要である堤防やインフラとして重要な取水堰・橋梁への影響も大きいと考えられるからである。

本報告で対象とした破壊機構以外にも、護床工の上流端からの転動流失、本体の転動、水叩きの浮き上がり・流失、護床工中央・全体からの吸い出し、上下流水位差によるパイピング等が考えられる。これらについても順次研究が進んでいくことが望まれる。

また、床止め工はそもそも縦断形を制御する構造物であり、縦断形制御の河床変動予測計算の精度向上も重要である。上流からの供給土砂量の設定方法は精度向上するための課題の1つである。二極化が上流からの供給土砂量変化に対する応答であるのか、そうだとすれば、湛水池を持つ固定型横断構造物では中小出水時に副次的に発生してしまう構造物上下流での流砂量の不連続を改善する工夫等も重要な研究課題である。

謝辞：本報告における課題整理にあたって、河川技術開発制度の「河床低下状況下の河川における横断構造物の劣化・損傷・破壊予測技術の開発」における間瀬肇先生、秋山壽一郎先生、群馬大学 清水義彦先生とそのグループ、長岡技術科学大学の太塚悟先生とそのグループとの意見交換が有益であった。

参考文献

- 1) (財) 国土開発技術研究センター編: 床止めの構造設計手引き, 山海堂, 1998.
- 2) 内田龍彦, 福岡捷二, 渡邊明英, 山崎幸栄: 二次元水理構造物を越流する流れの数値計算, 水工学論文集, 第47巻, pp.817-pp.822, 2003.
- 3) 内田龍彦, 福岡捷二, 渡邊明英: 床止め下流部の局所洗掘の数値解析モデルの開発, 土木学会論文集, 768号/II-68, pp.45-pp.54, 2004.
- 4) 常任直人, 高木強治, 島崎昌彦, 吉永育生: 農業取水堰下流の河床変動状況と洪水時護床変形に関する実験的検討, 河川技術論文集, 第20巻, pp.301-pp.306, 2014.
- 5) 内田龍彦, 田中幸志, 福岡捷二: 護床工最下流粗度要素の移動限界と破壊の実験, 水工学論文集, 第48巻, pp.841-pp.846, 2004.
- 6) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦, 村上正吾: 堰の一被災機構としての護床工からの砂のぬけ出しによる空洞化の進行過程, 第31回水理講演会論文集, pp.359-pp.364, 1987.
- 7) 川口広司, 末次忠司, 日下部隆昭, 高田保彦: 水叩き下流護床工の石礫間詰めによる落差工下部パイピング対策の研究, 水工学論文集, 第48巻, pp.835-pp.840, 2004.
- 8) 藤田光一, 諏訪義雄: 減災システム整備における河川堤防技術, 河川技術に関する論文集, 第6集, pp.1-pp.6, 2000.
- 9) 川口広司, 諏訪義雄, 高田保彦, 末次忠司: 護床工下の河床材料の抜け出し及び下流跳水の非定常性と護床工の応答特性, 河川技術論文集, 第8巻, pp.243-pp.248, 2002.

(2018. 4. 3受付)